



## Tecnologías de aprovechamiento de biomasa forestal para energía en México

Viabilidad y recomendaciones generales para su selección

---

México, D.F., Marzo del 2015

## **TECNOLOGIAS DE APROVECHAMIENTO DE BIOMASA FORESTAL PARA ENERGÍA EN MEXICO. VIABILIDAD y RECOMENDACIONES GENERALES PARA SU SELECCION.**

### **1. CONTEXTO**

- 1.1 Roles de la dendroenergía en México.
- 1.2 Escenarios de corto, medio y largo plazo.
- 1.3 Opciones para generar electricidad.
- 1.4 Tecnologías disponibles y su viabilidad en el contexto mexicano
- 1.5 Desafíos y barreras a superar

### **2. RECURSOS DE BIOMASA FORESTAL PARA ENERGIA EN MEXICO**

- 2.1 Oferta potencial de madera para energía.
- 2.2 Costos de la biomasa forestal para energía: componentes principales.
- 2.3 Tenencia de los recursos forestales.

### **3. ESTRATEGIAS para GENERAR ENERGÍA con BIOMASA FORESTAL**

- 3.1 Cogeneración o generación de electricidad en industrias forestales
- 3.2 Cogeneración en otras industrias
- 3.3 Generación eléctrica “pura” en instalaciones dedicadas
- 3.4 Generación de calor de proceso con combustibles de madera
- 3.5. Resumen de estrategias

### **4. COSTOS DE INVERSION Y COSTOS DE OPERACIÓN**

*Esta sección presentará valores de referencia de costos para diferentes tecnologías.*

### **5. POTENCIAL DE DESARROLLO e IMPACTOS ESPERADOS**

- 5.1 Impactos por generación de energía eléctrica
- 5.2 Impactos por sustitución de combustibles fósiles

### **6. RECOMENDACIONES**

## 1. CONTEXTO

### 1.1. Roles de la dendroenergía en México.

La dendroenergía es la energía obtenida de la biomasa forestal. México es un país con abundantes recursos forestales y una larga historia de uso de madera para energía, que continúa en la actualidad. Sin embargo, las tecnologías modernas de aprovechamiento, transformación y uso final de biomasa forestal para energía todavía no han sido adoptadas y utilizadas en la medida de su potencial.

La biomasa forestal puede tener dos roles principales como fuente de energía:

- a) Como combustible no procesado, en *aplicaciones térmicas tradicionales*, domésticas o artesanales: leña para cocción, calefacción, secado, generación de vapor o calor directo.
- b) Como diferentes combustibles procesados (astillas, briquetas, pellets de madera, carbón vegetal, pyro-oil, syngas) utilizables en *aplicaciones térmicas y termoeléctricas industriales* para generar vapor, calor, y/o electricidad.

Los *roles tradicionales* son importantes, porque atienden las necesidades básicas de un cuarto de la población del país y de una buena parte de las microindustrias y talleres artesanales. Los *roles “modernos”* están poco desarrollados y son apenas atendidos por la industria nacional de equipos y servicios energéticos <sup>1</sup>. En gran parte, esto se debe a la competencia de combustibles fósiles y tarifas eléctricas subsidiadas. Por ello, la posibilidad de desarrollar opciones modernas y eficientes para uso de la dendroenergía depende mucho de cambios en las políticas de subsidios, mismas que actualmente reducen los precios pagados por los usuarios de combustibles fósiles y electricidad.

### 1.2. Escenarios de desarrollo

La tabla siguiente resume las posibilidades de desarrollo de la bioenergía bajo un escenario “FAVORABLE” y un escenario “Business as Usual – BAU”.

ESCENARIOS	CORTO PLAZO (1 A 5 AÑOS)	MEDIO PLAZO ( 5 A 10 AÑOS)	LARGO PLAZO (10 A 25 AÑOS)
<b>Favorable:</b> con políticas activas de apoyo directo a la dendroenergía, y eliminación de los subsidios a energía fósil	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Autogeneración eléctrica en muy baja potencia (&gt;1MWe)</li> <li>- Cogeneración ampliada en ingenios azucareros (5-15 MWe /unidad).</li> <li>- Sustitución de combustóleo en industrias pequeñas (&gt;4 MWt).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Generación eléctrica en baja potencia (5-15 MWe).</li> <li>- Cogeneración maximizada (alta presión, potencia firme) en ingenios azucareros (10-30 MWe/unidad).</li> <li>- Sustitución de combustóleo en industrias</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Reemplazo total del combustóleo.</li> <li>- Co-combustión máxima (pellets, &gt;30%) en carboeléctricas.</li> <li>- Generación eléctrica en media potencia (20-50 MW).</li> <li>- Producción comercial</li> </ul>

<sup>1</sup> En México hay un fabricante de calderas de biomasa y uno de astilladoras. Ninguna de las siete ESCOS en operación ofrece servicios energéticos basados en biomasa. Sólo dos empresas están especializadas en proveer biomasa combustible.

	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Co-combustión mínima (3 a 5%) en carboeléctricas.</li> <li>- Producción de briquetas para uso domiciliario y micro-industrial.</li> <li>- Uso de Carbón vegetal en siderurgia, &gt;3%.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>medianas (5-10 MWt).</li> <li>- Co-combustión media (5-15%) en carboeléctricas.</li> <li>- Producción de pellets para mercado interno y externo.</li> <li>- Aumentan la productividad y salud de bosques y selvas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>de syngas y pyro-oil (¿?).</li> <li>- Se maximizan la productividad y la salud de bosques y selvas.</li> </ul>
<b>BAU:</b> con políticas de subsidio directo o indirecto a energéticos fósiles y a otras fuentes renovables de energía	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Cogeneración mínima, para intercambio de energía, en ingenios.</li> <li>- Autogeneración en muy bajas potencias (sólo con subsidios directos, caso a caso).</li> <li>- Se mantienen los usos tradicionales de baja eficiencia.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Cogeneración ampliada en ingenios y otras agroindustrias.</li> <li>- Carbón vegetal en siderurgia con baja participación.</li> <li>- Se difunden equipos mejorados para usos tradicionales, sin cambio de combustible.</li> <li>- Cae la productividad de bosques y selvas.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Cogeneración maximizada en ingenios y otras agroindustrias.</li> <li>- Se minimiza la productividad y producción de bosques y selvas.</li> <li>- Muchas áreas forestales degradadas pasan a recuperación, conservación o Pago por Servicios Ambientales.</li> </ul>

Se observa que en ambos escenarios, las opciones de alto impacto positivo para dendroenergía corresponden a aplicaciones y usos finales térmicos, o de generación combinada de calor y electricidad (CHP). Las opciones puramente eléctricas son pocas y de baja potencia. Esto se debe que las opciones térmicas son mas simples, de menor inversión específica y utilizan equipos e instalaciones ya existentes.

### 1.3. Opciones generar electricidad

Bajo el marco regulatorio actual, es posible generar electricidad con biomasa forestal bajo tres modalidades o regimenes de operación

- autoabastecimiento: el consumidor genera electricidad para satisfacer sus necesidades propias; puede estar aislado, o conectado al servicio público si su proceso no afecta a la operación de la red pública. Los autoprodutores, de hecho, salen del mercado de energía –porque dejan de consumirla- pero no reducen las demandas de potencia del sistema mientras se mantienen conectados y con potencia contratada.
- intercambio: el consumidor se mantiene conectado, genera energía y entrega sus excedentes a la red con un sistema de compensación o “banco de energía”. La demanda total del potencia en el sistema no se reduce, pero si aumenta la generación de energía originada en la biomasa.
- venta al SEN: el generador –o cogenerador- vende su energía al sistema interconectado a un precio establecido por contrato con CFE. A veces, recibe también un pago por capacidad instalada (aplica en unidades de potencia mayor a 30MW, que son despachables).

La ley no permite que los particulares generen electricidad para su venta directa a los consumidores: solamente CFE puede vender y facturar servicios eléctricos.

### 1.4. Tecnologías disponibles y su viabilidad en el contexto mexicano:

En teoría, todas las tecnologías comerciales de aprovechamiento, transformación y uso final de biomasa para energía disponibles en el mundo podrían ser utilizadas en México. Sin embargo, por razones de escala y facilidad de asimilación, solo algunas tecnologías son aplicables o viables en cada caso.

En primer lugar, la viabilidad de la aplicación depende de la *escala o capacidad del proyecto*, que a su vez depende de la capacidad del recurso forestal disponible para producir biomasa energética en forma sustentable. La cantidad de biomasa forestal que se puede producir y destinar a energía en cada sitio depende del área forestal accesible, la productividad de madera cosechable en esa área (medida por el IMA, o Incremento Medio Anual) y la fracción del IMA que se puede destinar a uso energético. Una regla práctica para estimar la capacidad de un sitio es:

$$\text{Area productiva (Ha)} * \text{IMA (m}^3\text{r/Ha/año)} * \text{xx tMS/m}^3\text{r} * \text{Coeficiente de uso energético} = \text{tMS/año}$$

Donde xx tMS/m<sup>3</sup>r es el peso específico básico de la biomasa forestal (0.5 para coníferas, y 0.6 para latifoliadas), y 01 tMS = 5 KWHt .

La posibilidad de *asimilar e integrar la tecnología* en el contexto empresarial y socio-cultural local también condiciona la viabilidad económica y social de un proyecto dendroenergético. La posibilidad de asimilación depende de varios factores, pero los principales son:

- a) el nivel de preparación técnica de los trabajadores y administradores locales
- b) la capacidad financiera de la empresa
- c) la capacidad del proyecto para generar beneficios tangibles a la empresa y la población local

Cualquiera de estos tres factores puede ser limitante (o constituir una barrera difícil de superar) en un proyecto de desarrollo dendroenergético.

La *eficiencia* del aprovechamiento dendroenergetico se suele considerar como un factor de viabilidad, y se lo valora utilizando indicadores de eficiencia termodinámica (  $\eta$  = energía útil entregada / energía primaria consumida). Esto es correcto para medir la eficiencia de una máquina térmica, pero no refleja bien la eficiencia de aprovechamiento energético de un sistema en su conjunto. En muchos casos, es posible que con máquinas poco eficientes se logren estructurar sistemas dendroenergéticos que produzcan una alta cantidad de energía útil final. Por eso se recomienda evaluar el desempeño de un sistema o proyecto considerando la energía útil finalmente entregada a los usuarios, en relación a los recursos de biomasa forestal disponibles para ese sistema o proyecto.

### 1.5. Desafíos y barreras a superar

Algunos de los *desafíos* mas importantes a superar por la dendroenergía en el México de hoy son:

- 
- asegurar un manejo intensivo de los bosques que permita cosechar todo su crecimiento potencial;
  - utilizar sistemas de aprovechamiento basados en el manejo sostenible de los recursos existentes;
  - incorporar tecnologías maduras, probadas en contextos similares y con costos competitivos;
  - contribuir a la transición energética sustituyendo a energéticos fósiles con alta mitigación de emisiones;
  - desarrollar un mercado de biocombustibles de madera con normas de calidad, precios transparentes, venta de futuros, contratos de largo plazo, etc. .

Las principales *barreras* a superar son:

- las actuales formas de acceso al uso de recursos forestales;
- los desequilibrios e inequidades generadas por los subsidios directos e indirectos a la energía fósil;
- la falta de compromisos políticos de medio y largo plazo, que permitan financiar y amortizar las inversiones requeridas;
- la poca participación de la iniciativa privada en el desarrollo de la dendroenergía.

En resumen, los desafíos y barreras principales para desarrollar la dendroenergía no son de naturaleza tecnológica, o por lo menos no radican en las tecnologías “duras”. Las tecnologías dendroenergéticas maduras existen, pero no se adoptan en México porque hay barreras de mercado, de acceso a los recursos forestales, o de inseguridad jurídica.

## 2. RECURSOS DE BIOMASA FORESTAL PARA ENERGIA EN MEXICO

*Este capítulo describe brevemente la situación de los recursos forestales: distribución geográfica, productividad, usos actuales, régimen de tenencia; con énfasis en la biomasa utilizable para energía.*

### 2.1 Oferta potencial de madera para energía.

Una vez excluidos los bosques de alto valor de conservación, los de baja productividad y lo inaccesibles, los recursos aptos para producir energía son la mayoría de los bosques templados (pino, encino y pino-encino) y las selvas tropicales (alta, media y baja), como se resume a seguir:

Recursos Forestales	Existencias (tMS/Ha)	IMA (tMS/Ha/a)	Superficie accesible (millones de Ha)	Producción sostenible Millones de tMS/año	
Bosques de Pino	85	2	5	10	9%
Bosques de Pino-Encino	50	2	8	16	14%
Bosques de Encino	40	2	6	12	10%
Selva Alta	250	5	2	10	9%
Selva Media	110	4	8	32	28%
Selva Baja	50	3	12	36	31%
TOTAL	n.c.	n.c.	41	116	100%

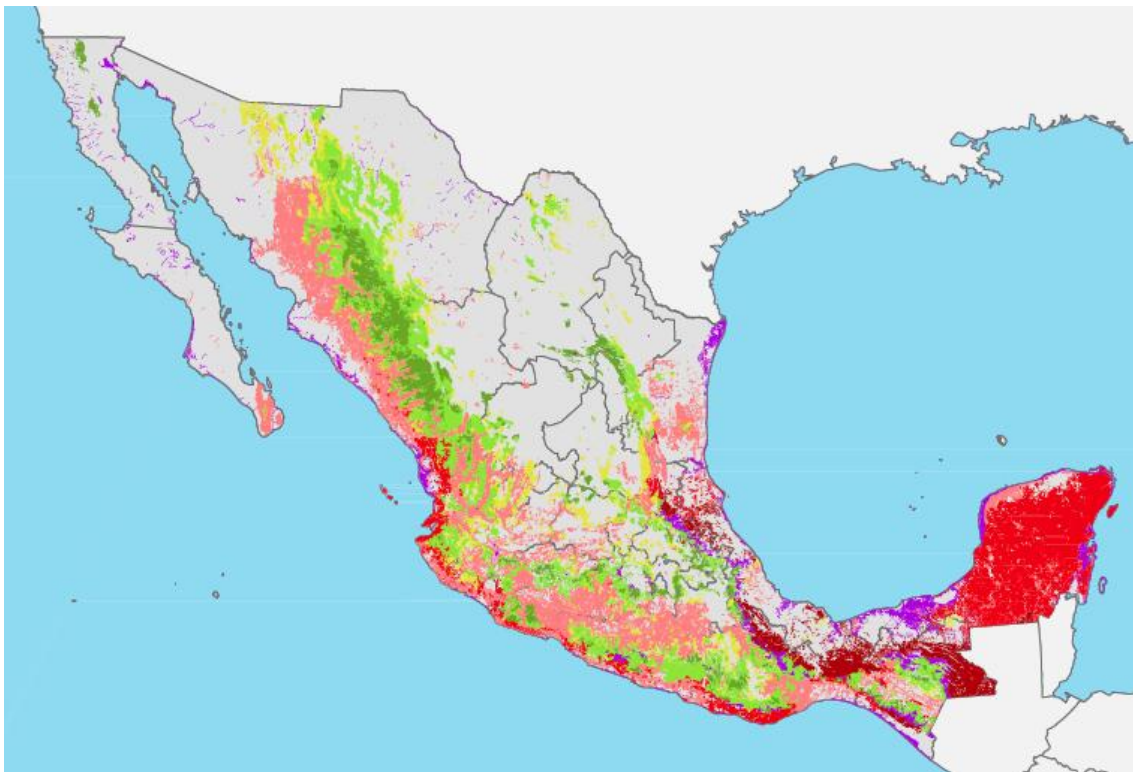
El crecimiento anual de los recursos forestales accesibles es de 116 millones de tMS por año. Actualmente, se aprovechan unos 6 millones de tMS para aserrar y 20 millones de tMS para leña y carbón. El crecimiento remanente no aprovechado (unos 90 MtMS/año) queda en el bosque y se pierde por mortalidad, descomposición e incendios (principalmente en la Selva Media y Selva Baja). La mitad de lo procesado en aserraderos queda como residuos (costeros, aserrín, cortezas, despuntes).

Evidentemente, los residuos de las industrias madereras son la biomasa forestal mas barata y de más fácil acceso, porque están concentrados y sus costos de adquisición y extracción ya fueron pagados. Sin embargo, son la fuente menos abundante y su potencial actual es limitado: unos 3 millones de tMS/a, o 15 millones de MWh/año. El crecimiento no aprovechado de bosques y selvas (90 MtMS/a) tiene un potencial 30 veces mayor que el de los residuos.

Otra limitación propia de los residuos de aserradero es su bajo peso específico aparente (de 0.080 tMS/m<sup>3</sup> para aserrín, a 0.200 tMS/m<sup>3</sup> para costeros). Esto hace oneroso su transporte “in natura” y obliga a densificar y secar los residuos

que se van a utilizar a distancias importantes de los centros de aserrado. En cambio, la madera rolliza tal como se la cosecha, tiene un peso específico aparente de 0.4 tMS/m<sup>3</sup>, lo que permite su transporte a distancias mayores.

La figura ilustra la distribución de selvas tropicales (en púrpura, rojo y rosa) y bosques templados (en tonos de verde). Las formaciones de alto valor de conservación (principalmente humedales y bosques de niebla) están en color violeta. Como se observa, hay una alta concentración de recursos forestales en la península de Yucatán (Q.ROO, YUC, CAMP), pero los restantes Estados también tienen recursos abundantes, con pocas excepciones.



## 2.2 Costos de la biomasa forestal para energía: componentes principales.

Hay cuatro componentes principales del costo de la biomasa forestal para energía: la madera en pie, el aprovechamiento, la transformación y el transporte.

*El valor de la madera en pie* se fija por la demanda del mercado: en México oscila entre 100 y 500 \$MEX/m<sup>3</sup>r, o unos 200 a 1000 \$MX / tMS. Los menores valores corresponden a leña de árboles no aptos para aserrar, los mayores a madera rolliza de pinos.

*El costo del aprovechamiento* depende de la tecnología empleada para el corte, acarreo, carga y flete, la que a su vez depende de las condiciones del terreno. En



terrenos planos y sin impedimentos se tienen costos bajos, de 100 a 200 \$MX/m<sup>3</sup> o 200-400 \$MX/tMS, incluyendo las operaciones de marcaeo, derribo, trozado y acarreo a borde de brecha o camino. En terrenos accidentados estos costos pueden duplicarse. Si se trata de combustibles procesados, el aprovechamiento no termina con la madera a borde de brecha; es necesario transportarla hasta el centro de procesamiento. El costo de flete o transporte al centro de procesamiento depende de la distancia y de la calidad de los caminos forestales: puede variar entre 100 y 300 \$MEX/tMS.

*El costo de transformación* de la madera en combustible es muy variable: para el astillado se estima entre 180 y 250 \$MX/tMS en instalaciones de capacidad mediana. Para producir briquetas, hay que agregar 400 a 500 \$MX/tMS. Para producir pellets se debe considerar 600 a 700 \$MX/tMS.

	Madera en pie	Aprovechamiento	Flete corto	Transformación	Costo Final
Mínimo	\$ 100	\$ 200	\$ 100	\$ 250	<b>\$ 650 / tMS</b>
Máximo	\$ 200	\$ 400	\$ 300	\$ 700	<b>\$ 1600 /tMS</b>

*El costo de transporte* con equipos pesados (trailers de 30 t) es aproximadamente de 1.00 \$MX/t.km. Si se trata de biomasa combustible húmeda (como aserrín o astillas de madera verde, con 40 o 50% de humedad) el transporte incide mucho en el costo final de la energía útil. Pero si se trata de material seco, con 10% de humedad, la incidencia del costo de transporte no es muy grande: puede agregar 110 \$MX/tMS por cada 100 km recorridos.

### 2.3 Tenencia de los recursos forestales.

Una particularidad de México es que la tenencia de los recursos forestales está concentrada en el sector de propiedad social: los ejidos y comunidades tienen los derechos de uso de más del 70% de las tierras forestales. Otra particularidad es que los ejidos y comunidades prefieren casi siempre hacerse cargo por sí mismos del aprovechamiento de la madera y su transformación. A veces permiten el uso a terceros, que pagan un canon por la madera cosechada ("venta de madera en pie"). Pero son muy raros los casos donde los ejidos o comunidades ceden los derechos de uso y manejo de los bosques a terceros -o los comparten- por un plazo suficiente para asumir y llevar a cabo un programa de manejo decenal.

Esta realidad hace difícil e incierta la operación de empresas que dependen del suministro de materias primas forestales en forma regular y programada, ya que los acuerdos de venta o abastecimiento con los Ejidos son anuales: pueden ser interrumpidos si no se renegocian a satisfacción de ambas partes, o si los propietarios forestales no cumplen las prescripciones del programa de manejo forestal ocasionando que la SEMARNAT les retire o no renueve la autorización de aprovechamiento anual.

---

Para empresas que se dediquen al suministro de madera para energía o que dependan de ese suministro, este nivel de inseguridad es inaceptable y por lo general hace inviable los emprendimientos de largo plazo. Como contrapartida, las pocas empresas dispuestas a tomar el riesgo de un suministro interrumpible de materia prima lo compensan reduciendo mucho el precio que están dispuestas a pagar por esa materia prima. Los abastecedores ven reducidos sus ingresos, pierden interés y prestan poca atención y esfuerzo a la producción de madera para energía. Se genera así un círculo vicioso: inseguridad de suministro → bajos precios → baja producción → bajos ingresos → incumplimientos → precios más bajos.

### **3. ESTRATEGIAS para GENERAR ENERGÍA con BIOMASA FORESTAL**

#### **3.1 Cogeneración o generación de electricidad en industrias forestales**

Esta estrategia tiene como ventaja principal el bajo costo de la biomasa forestal, que generalmente es residuo del proceso de aserrado, considerado sin valor –a veces, con un costo de disposición final-.

Se dice que la generación de electricidad en los aserraderos mejora la competitividad y baja los costos de producción de estas industrias, pero esto – cuando se logra- tiene un efecto mínimo sobre su rentabilidad, porque el costo de la electricidad rara vez supera al 10% del costo total de producción, y la autogeneración sólo permite reducir los costos finales de producción en 2 a 3%.

Por otro lado, la co-generación de calor y electricidad en industrias forestales debe resolver dos problemas operativos: a) la baja e irregular demanda térmica de los aserraderos -que no permite co-generar con alta eficiencia- b) las pocas horas de trabajo de los aserraderos (típicamente, 40 semanas/año \* 5 días / semana \* 8 hs/día = 1600 hs/año).

De hecho, la cogeneración solo es técnicamente viable donde hay una demanda de energía térmica constante y elevada (4 a 5 veces mayor que la demanda de electricidad) y donde el generador pueda interconectarse a la red pública para intercambiar energía. La demanda media de potencia eléctrica de aserraderos grandes es de 150 a 300 KW y debe ligarse con una demanda térmica de 600 a 1200 KW para realizar una cogeneración eficiente y no tener que instalar un sistema de enfriamiento que evacúe el calor residual excedente de la planta eléctrica.

#### **3.2 Cogeneración en otras industrias**

Existen en México varios ramos industriales con instalaciones de cogeneración ya operativas y puede ser interesante asociarse a ellos para cogenerar electricidad y calor con biomasa forestal. En el ramo azucarero/alcoholero, que tiene calderas de combustible sólido, se puede usar biomasa forestal con un mínimo procesamiento y sin inversiones adicionales. Su eficiencia de conversión a electricidad es baja (16 a 20%), pero allí se utiliza el calor residual en la fabricación de azúcar o alcohol, alcanzando una eficiencia total mayor al 90%. Hay 53 ingenios en operación en México, con una capacidad de cogeneración ya instalada de unos 500 MW en zafra, o 900 MW fuera de zafra. Hay también unas 9 destilerías de alcohol que operan (una es autónoma, y las demás son anexas a ingenios) y una veintena de destiladoras de tequila –aunque éstas últimas no tienen calderas de combustible sólido-.

Otro ramo industrial que co-genera electricidad y calor de proceso es el celulósico-papelero. También tiene calderas de combustible sólido y posee gran experiencia en el manejo de madera rolliza y astillas, y inarticular en la quema de cortezas y

astillas “sucias”. El potencial es de 40 a 50 MW, con la ventaja adicional de que operan todo el año ( $330 \text{ d/a} * 24 \text{ h/d} = 7920 \text{ h/a}$ ) y pueden ofrecer potencia firme. Su eficiencia de conversión a electricidad es similar a la de la industria azucarera.

La estrategia de cogeneración en otras industrias permite utilizar instalaciones y equipos ya existentes, requiere un mínimo de inversiones adicionales, y no demanda nuevas capacidades técnicas o administrativas. Se maximiza el uso de equipos y capacidades existentes, sub-utilizadas por falta de biomasa combustible, o por los bajos precios de la electricidad. Sus costos de operación son bajos: los equipos, instalaciones y estructuras administrativas ya existen. Una ventaja adicional es que pueden entrar en servicio casi de inmediato.

Las desventajas principales de esta estrategia son:

- a) la biomasa forestal debe transportarse a las plantas cogeneradoras, y
- b) se necesita la preparación de la biomasa (secado y astillado) para quemarla eficientemente .

Sin embargo, vale notar que el secado natural en origen es de muy bajo costo y reduce el peso a transportar en 20 a 30%, abaratando su transporte. El astillado puede ser en origen o en destino, y en el segundo caso las instalaciones y equipos necesarios ya existen en las plantas celulósicas.

En esta estrategia los productores forestales no necesitan incorporar nuevas tecnologías, y pueden utilizar los residuos de su industria más los residuos del aprovechamiento actual como puntas y ramas, y también el crecimiento actualmente no cosechado (especies no comerciales, árboles enfermos o muertos, aclareos pre-comerciales). Pero es claro que no pueden percibir todo el valor agregado por el proceso de generación de energía y deben negociar con el cogenerador una compensación o un precio adecuado por la biomasa. Una parte del valor de la biomasa puede ser compensado con electricidad.

### 3.3 Generación eléctrica “pura” en instalaciones dedicadas

En esta estrategia, el único energético generado es la electricidad, en instalaciones y equipos destinados a este solo fin. Según la experiencia internacional estas plantas son económicamente viables a partir de 8 - 15 MW, donde el costo de la biomasa sea menor a 40 USD/tMS, el precio de la energía sea mayor a 120 USD/MWH, y haya pagos por capacidad que compensen el tiempo no trabajado por razones de despacho – o en su defecto, un despacho preferente asegurado- . Debe haber además un contrato de largo plazo (20 a 25 años) para provisión de electricidad.

Esta estrategia sólo se puede implementar en sitios con gran oferta de biomasa forestal, de bajo costo y a largo plazo. Como el consumo anual es de unas 8 mil tMS/MW, una planta de 10 MW necesita 80 mil tMS/a o 160 mil m<sup>3</sup>/año. Esto requiere como mínimo 40 mil hectáreas de bosques o selvas bajo manejo sostenible asegurado por 20 o 30 años. Los ejidos forestales que tienen esa

superficie productiva bajo manejo son muy pocos, por lo que se debería asociar a ejidos cercanos para asegurar el volumen necesario. La opción de establecer plantaciones forestales para reducir el área necesaria implica inversiones altas (mas de mil USD/ha o unos 20 USD/tMS) y obliga a considerar un tiempo de maduración prolongado (5 a 10 años).

### 3.4 Generación de calor de proceso con combustibles de madera

En esta estrategia, se reemplazan combustibles fósiles en procesos industriales que consumen calor. Se procura sustituir a los energéticos fósiles mas caros o más contaminantes en cualquier aplicación que admita el uso de biocombustibles de madera. Para muchas aplicaciones se requiere un procesamiento previo de la madera combustible (astillado, secado, briquetado, peletizado). Algunas posibilidades son:

APLICACION	PROCESO	COMBUSTIBLE	REEMPLAZA A
Industrias de cal	Calcinación	Astillas de madera	Combustóleo, Gas Natural
Cementeras	Clinkerización	Corteza, Astillas	Gas natural, coque de petróleo
Alcoholeras	Destilación	Astillas	Combustóleo, gas natural
Azucareras	Co-generación	Astillas, cortezas	Combustóleo, bagazo de caña
Siderurgia	Reducción	Carbón vegetal	Coque siderúrgico
Ladrilleras, tejas	Sinterización	Astillas, pellets	Combustóleo
Panaderías	Panificación	Briquetas, pellets	GLP, diesel oil
Secado de granos	Secado	Astillas, pellets	Diesel oil, combustóleo, GLP, GN
Lácteas	Generación de Vapor	Astillas, pellets	GLP, diesel oil, combustóleo, GN

Algunas ventajas del uso de los combustibles procesados de madera en aplicaciones térmicas:

- se reduce inmediatamente el consumo de energéticos fósiles
- se logra una importante mitigación de emisiones
- hay gran variedad de aplicaciones y demandas
- se abren mercados amplios, diversificados y de gran volumen, tanto locales como distantes.

Hay muchas tecnologías disponibles para uso térmico directo:

- cuando el combustible se puede mezclar o mantener en contacto con el material a procesar (como en los hornos de cemento, de cal, de arrabio) no se requieren dispositivos especiales

- cuando se genera vapor, es necesario reemplazar los quemadores de combustible líquido o gaseoso con quemadores de sólidos o con gasificadores –y en algunos casos, cambiar la caldera completa-.
- para muchas aplicaciones (de calor directo y en calderas) existen quemadores de pellets completamente automáticos que no necesitan operarios. Las astillas también se manejan en forma mecanizada, aunque no totalmente automatizada.

Al sustituir combustibles de alto costo, como GLP, diesel oil y combustóleo, los combustibles de madera procesados tienen ventajas económicas que los hacen competitivos y permiten costear su transporte a largas distancias, e incluso en el mercado internacional como en el caso de los pellets de madera.

### 3.5 Resumen de estrategias

Hay distintas estrategias aplicables para desarrollar la dendroenergía en México. Todas tienen objetivos comunes: generar energía renovable, reducir las emisiones de GEI y contribuir al uso productivo y la conservación de los recursos forestales. Las aquí mencionadas son compatibles entre sí, y pueden implementarse en forma paralela, aunque sus resultados se darán en tiempos diferentes.

En vista de las condiciones de contexto del sector forestal mexicano, parece lógico iniciar el desarrollo de la dendroenergía con las estrategias de promoción del uso de combustibles forestales de mas bajo nivel de transformación y menor inversión, para adoptar después otras estrategias de mayor complejidad y mas alta inversión a medida que el mercado se desarrolle y se genere confianza en los usuarios.

## 4. COSTOS DE INVERSION Y COSTOS DE OPERACIÓN

### 4.1 Costos de inversión

Mas abajo se presentan unos valores indicativos sobre las inversiones necesarias para distintas opciones de procesamiento de biomasa forestal para energía.

COSTOS DE INVERSION	Capacidad		INVERSION	Inversión unitaria	
	tMS/h	MW		USD/tMS/h	USD/MW
Astillado móvil	4	20*	\$40,000	\$10,000	\$2,000
Astillado fijo	10	50*	\$60,000	\$6,000	\$1,200
Briquetado	2	10*	\$320,000	\$160,000	\$32,000
Pelletización	4	20*	\$2,400,000	\$600,000	\$120,000
Cogeneracion ORC	0.6	0.6 <sup>+</sup>	\$2,000,000	\$3,333,333	\$3,333,333
Generacion a vapor	5	5 <sup>+</sup>	\$15,000,000	\$3,000,000	\$3,000,000
Motogenerador con Gasificador	0.4	0.5 <sup>+</sup>	\$1,200,000	\$3,000,000	\$2,400,000
Cogeneracion ampliada en ingenio	10	15 <sup>+</sup>	\$13,500,000	\$1,350,000	\$900,000
Cogeneracion maximizada en ingenio	25	30 <sup>+</sup>	\$45,000,000	\$1,800,000	\$1,500,000

- \* potencia térmica <sup>+</sup> corresponde a la potencia electrica

Se observa que las inversiones unitarias para producir combustibles de madera son de cien a mil veces menores que las necesarias para lograr la misma capacidad de generación de electricidad. Aun considerando que las horas de operación anual de las plantas eléctricas duplican o triplican a las de plantas de combustibles sólidos, la intensidad de capital requerida es muy diferente. Donde el acceso al capital de inversión sea escaso y al acceso al capital natural sea amplio, las alternativas de menor inversión unitaria obtendrán el mayor impacto positivo en el desarrollo de la dendroenergía.

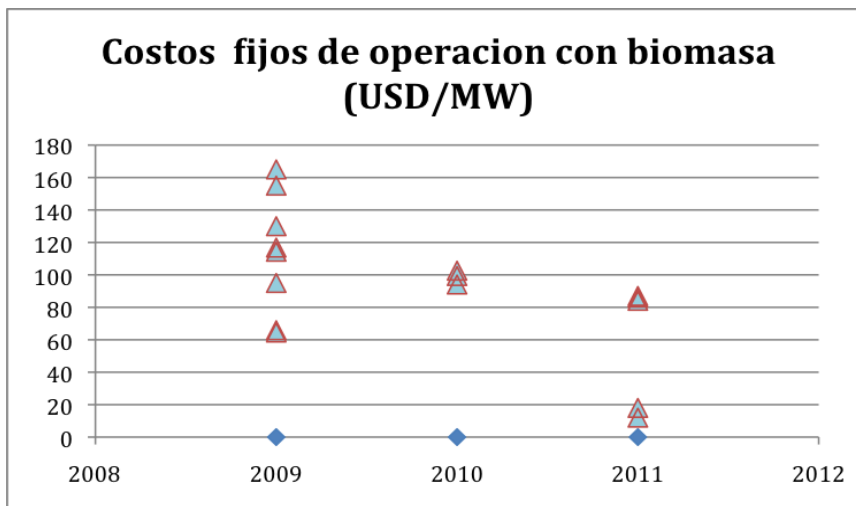
### 4.2 Costos de operación

Los costos de operación de un aprovechamiento de madera para energía pueden ser muy diferentes, según la empresa, las condiciones del sitio y la capacidad. Hay dos componentes básicos de costos :

- los costos fijos,
- los costos variables.

Costos Fijos: son la suma de costos que se deben pagar independientemente de la cantidad de energía generada por la instalación. Se originan en los costos del capital de posesión y de mantenimiento regular. En los contratos de suministro de potencia eléctrica, se los compensa con un pago por capacidad instalada.

Como se aprecia en el gráfico, el rango de valores de costos fijos en instalaciones de generación de electricidad con biomasa es muy amplio, variando entre 10 y 160 USD/MW.

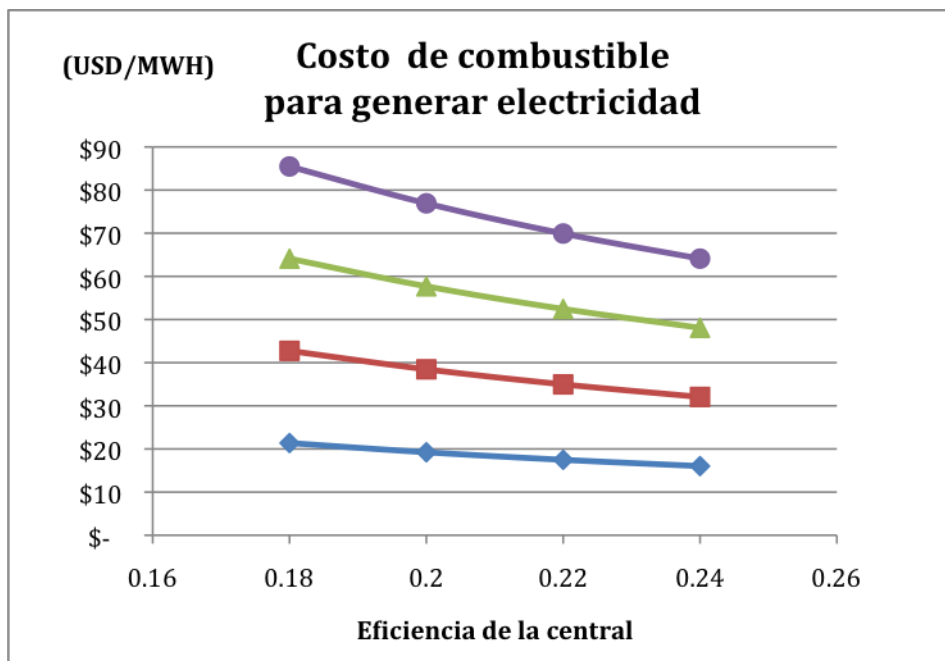


Los costos variables de generación de electricidad con biomasa corresponden básicamente a el costo de adquisición y manejo del combustible, más otros gastos variables de operación y mantenimiento. Si el personal ocupado en la planta es estable, el costo de esa mano de obra es un costo fijo. Por eso, muchas veces se tercerizan ciertas operaciones como el manejo de combustible (recepción, almacenamiento, procesamiento) para tratarlas como costos variables.

La sección presenta unas estimaciones de costos de producción de combustibles de madera procesados, que varían entre 650 y 1600 \$MX/tMS. Pero debe notarse que en el caso de los residuos se pueden asignar costos menores, o valores similares al precio de mercado de esos residuos, si lo tienen.

El costo del combustible incide de modo diferente según sea la eficiencia de conversión a electricidad. La figura de mas abajo ilustra el impacto del costo de la biomasa en el costo final de la energía eléctrica, para diferentes valores de eficiencia y para cuatro precios de referencia de biomasa puesta en planta (250 \$MX/tMS; 500 \$MX/tMS; 750 \$MX/tMS; 1000 \$MX/tMS). Se observa que el aumento de la eficiencia afecta poco al el costo final de le electricidad, en comparación con el costo inicial de la biomasa.





## 5. POTENCIAL DE DESARROLLO e IMPACTOS ESPERADOS

Como ya indicado en el ítem 2.1 el potencial sostenible de producción de madera para energía, sin afectar a los usos y demandas actuales, es del orden de 90 millones de tMS por año. Esto equivale a 1620 PJ, o el 32% del consumo nacional de energía primaria en el año 2011, que fue de 4,994 PJ.

Debe notarse que este es el potencial técnico del recurso, y que su potencial económico puede ser bastante menor.

Los principales impactos son de tres tipos: aumento del uso de madera y residuos forestales con la consecuente generación de valor agregado; generación de energía eléctrica o térmica; y mitigación de emisiones de GEI.

### 5.1 Impactos por generación de energía eléctrica

La tabla siguiente resume los potenciales de generación de electricidad a corto plazo (5 años) y en un escenario de políticas favorables, con amplios recursos para inversión.

<b>Generación de Electricidad</b>	Potencia MWe	Generación MWH/a	Eficiencia	Consumo tMS/a	Mitigación GEI tCO <sub>2e</sub> /a
En Aserraderos	6	48000	0.18	53,333	26,667
En Ingenios Azucareros	300	1296000	0.18	1,440,000	720,000
En Alcoholeras	18	126000	0.16	157,500	78,750
En Celulósicas	30	240000	0.16	300,000	150,000
En Carboeléctricas	210	1680000	0.37	908,108	454,054
<b>Subtotal Electricidad</b>	<b>564</b>	<b>3,390,000</b>		<b>1,950,833</b>	<b>1,429,471</b>

Se observa que los mayores impactos potenciales a corto plazo podrían darse por la cogeneración en las industrias azucareras y por la co-combustión en carboeléctricas. El consumo total de madera y residuos para energía, según esta proyección de corto plazo, podría llegar a casi 2 millones de tMS/año o cerca de 4 millones de m<sup>3</sup>r/año. El potencial de mitigación es de 1.4 millones de tCO<sub>2e</sub> /año.

### 5.2 Impactos por sustitución de combustibles fósiles

La tabla siguiente estima los impactos que pueden lograrse en el corto plazo mediante la sustitución de combustibles fósiles por combustibles procesados de madera.

<b>Usos térmicos directos para sustituir energía fósil</b>	Usuarios unidades	Uso anual tMS/unid/a	Consumo tMS/a	Mitigación GEI tCO <sub>2e</sub> /a
Astillas en industrias pequeñas	400	3000	1,200,000	1,776,000
Briquetas uso doméstico	500000	1.56	780,000	998,400
Carbón vegetal en siderurgia 3%	2	144000	288,000	426,240
<b>Subtotal Usos Termicos</b>			<b>2,268,000</b>	<b>3,200,640</b>

Las tecnologías de procesamiento seleccionadas son las más simples y de menor inversión, como astillado, briquetización y carbonización; las que pueden ser adoptadas por empresas forestales medianas a corto plazo. Las inversiones necesarias serían modestas, de cincuenta a trescientos mil dólares por cada unidad de procesamiento o empresa.

## 6. RECOMENDACIONES

El propósito de las consideraciones realizadas en este documento es ayudar a evaluar la viabilidad de uso de las tecnologías de aprovechamiento de madera para producir energía y orientar algunas prioridades para su selección y aplicación en el contexto de México. A seguir, se resumen las principales recomendaciones :

### a. Sobre la viabilidad de uso de las tecnologías dendroenergéticas

*Seleccionar tecnologías adecuadas a la capacidad de cada sitio para producir biomasa forestal de modo sostenible, con sistemas de manejo que maximicen el crecimiento de madera cosechable.*

*Preferir las tecnologías asimilables e integrables en la empresa y en su contexto socio-cultural específico, considerando: a) el nivel de preparación técnica de los trabajadores y administradores; b) la capacidad financiera de la empresa y c) la capacidad del proyecto para generar beneficios tangibles a la empresa y a la población local.*

*Tener en cuenta que las menores inversiones fijas necesarias son las de sistemas de producción de biocombustibles sólidos.*

*Evaluar el desempeño de los sistemas o proyectos considerando la energía final entregada a los usuarios en relación a los recursos de biomasa forestal disponibles en ese sitio.*

### b. Sobre las prioridades para el desarrollo de aprovechamientos dendroenergéticos

*Priorizar el uso de tecnologías comerciales y probadas, aunque sean de eficiencia menor que las de tecnologías emergente o novedosas.*

*Seleccionar tecnologías de baja eficiencia y baja inversión para aprovechar biomasa de bajo costo, y tecnologías de alta eficiencia y alta inversión para la biomasa de alto costo.*

*Priorizar la co-generación de electricidad y calor antes que la generación eléctrica pura y considerar para ellos la posibilidad e aprovechar capacidades ya existentes de co-generación en otros sectores de la producción.*

*Priorizar la producción de biocombustibles sólidos que puedan reemplazar a los fósiles en aplicaciones de alta demanda como: calderas industriales; hornos de cal y cemento; secaderos de granos; altos hornos siderúrgicos; hornos de ladrillos y tejas; etc.*



© Deutsche Gesellschaft für  
Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH  
Dag-Hammarskjöld-Weg 1-5  
65760 Eschborn/Alemania  
[www.giz.de](http://www.giz.de)

- Cooperación Alemana al Desarrollo -

Agencia de la GIZ en México  
Torre Hemicor, PH  
Av. Insurgentes Sur No. 826  
Col. del Valle  
C.P. 03100, México, D.F.  
T +52 55 55 36 23 44  
F +52 55 55 36 23 44  
E [giz-mexiko@giz.de](mailto:giz-mexiko@giz.de)  
I [www.giz.de/mexico](http://www.giz.de/mexico)